# Stabilité des pentes et des talus

# I. Classification des mouvements de terrain

## 1) Pentes naturelles :

On distingue :

- ✓ Les écroulements ;
- ✓ Les glissements : plans , rotationnels simples, rotationnels complexes ;
- ✓ Fluages et solifluxions
- ✓ Coulées boueuses

## 2) Talus artificiels

Ils sont affecté principalement par les glissements et parfois par les phénomène de fluage, selon le type d'ouvrage on distingue :

- ✓ Les talus en déblai;
- ✓ Les talus en remblai sur sol non compressible;
- ✓ Les talus en remblai sur sol compressible;
- ✓ Les ouvrages de soutènement vis-à-vis d'un glissement profond;

# II. Description des principaux types de mouvements

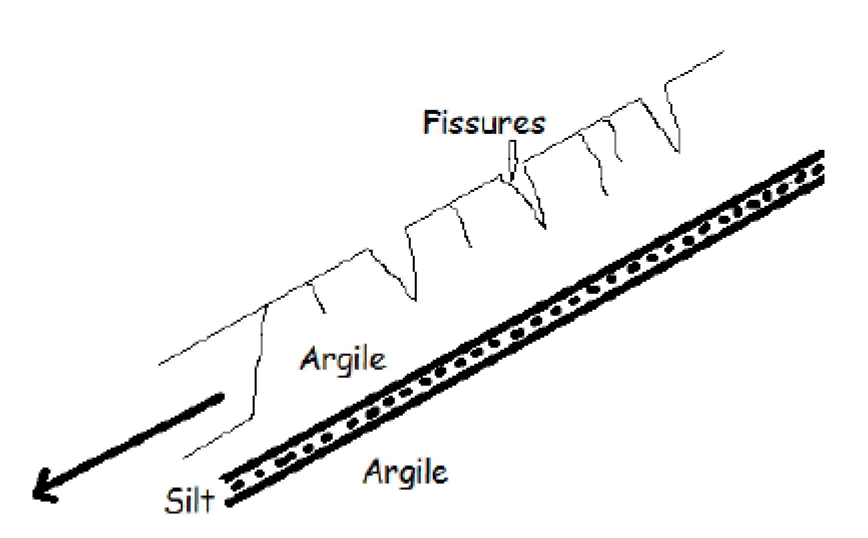
## 1) Les écroulements et chutes de pierres

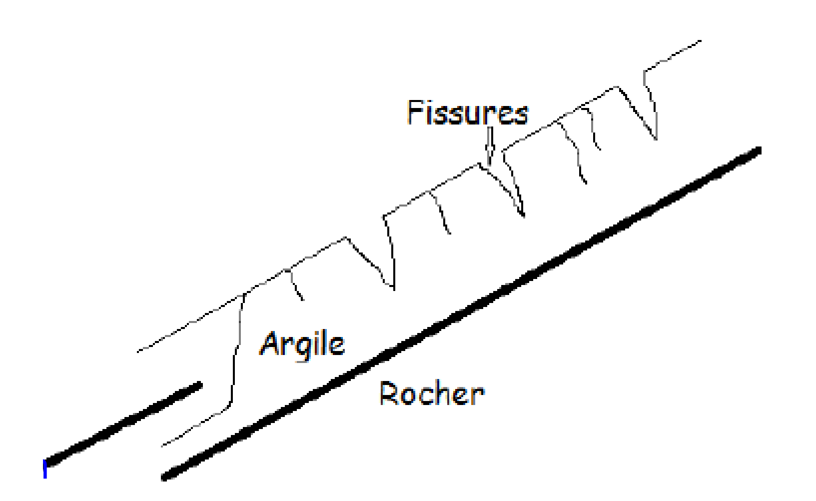
Ils concernent principalement les masses rocheuses , et sont dangereux car soudains

## 2) Les glissements

### a) Glissement plan

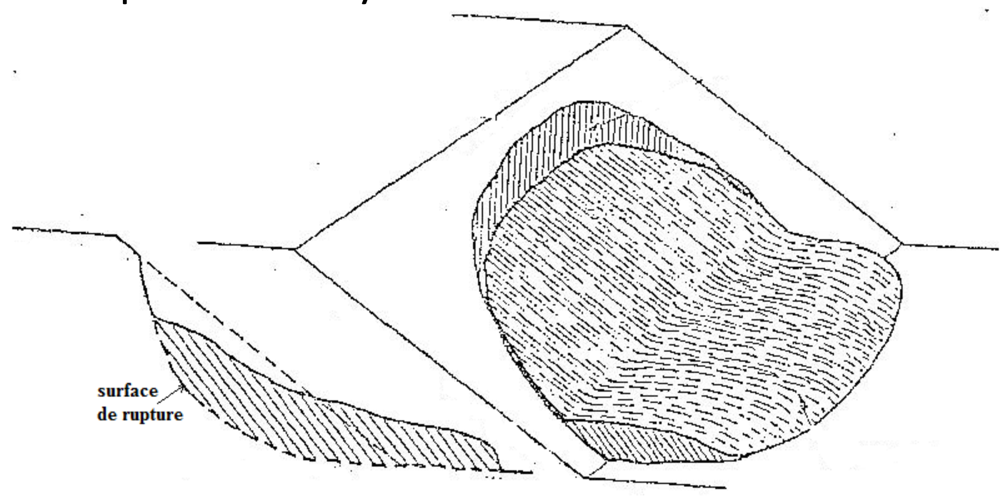
En général la ligne de rupture suit une couche mince ayant de mauvaises caractéristiques mécaniques, et sur laquelle s'exerce souvent l'action de l'eau. On l'appelle « couche savon »



## b) Glissement rotationnel simple

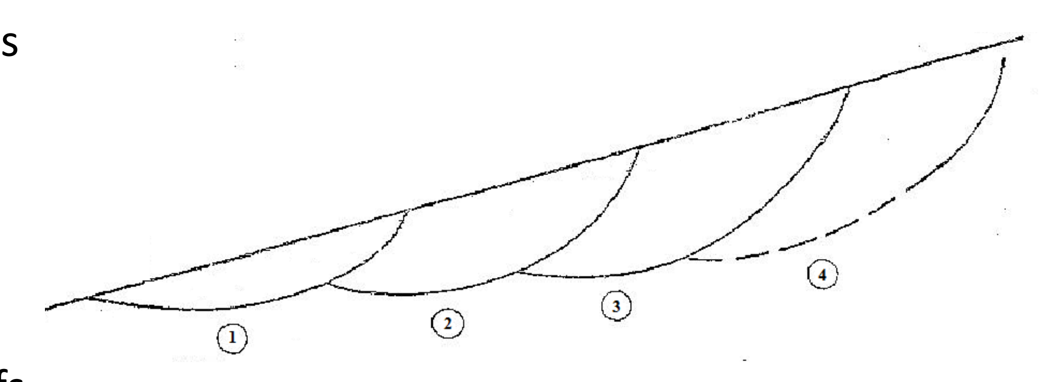
C’est le type de glissement le plus fréquent. La surface de rupture a une forme simple et peut être assimilée à une portion de cylindre .




Le plus souvent la ligne de rupture est assimilée à un cercle : glissement circulaire. Si la ligne de rupture a une forme plus complexe le glissement est dit non circulaire

## c) Glissement rotationnel complexe

Il s’agit de glissements multiples emboités les un dans les autres .
L’apparition du premier glissement , en bas de la pente conduit à une perte de butée pour les terres situées au dessus et provoque ainsi les glissement successifs

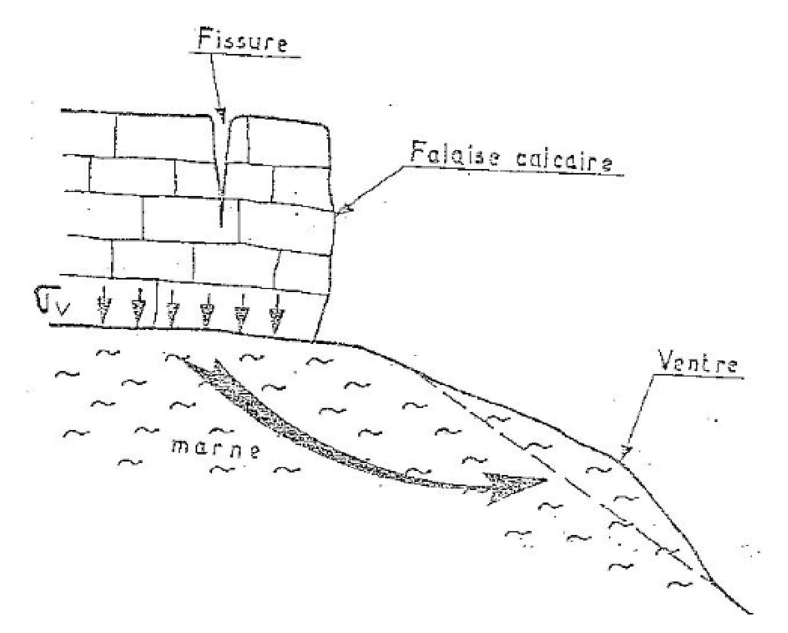


## 3) Fluage et solifluxion

### a) Le fluage

Le phénomène de fluage correspond à des mouvements lents dus à des sollicitations proches de la rupture. L'état ultime peut être soit la stabilisation soit la rupture .

Sur la figure suivante la couche de marne flue sous l'effet du poids du massif de calcaire et entraine ainsi la fissuration de la falaise ou même sa rupture




### b) La solifluxion

C'est un cas particulier du fluage . C'est un phénomène superficiel provoqué par les variations volumiques du sol à cause du gel et dégel .

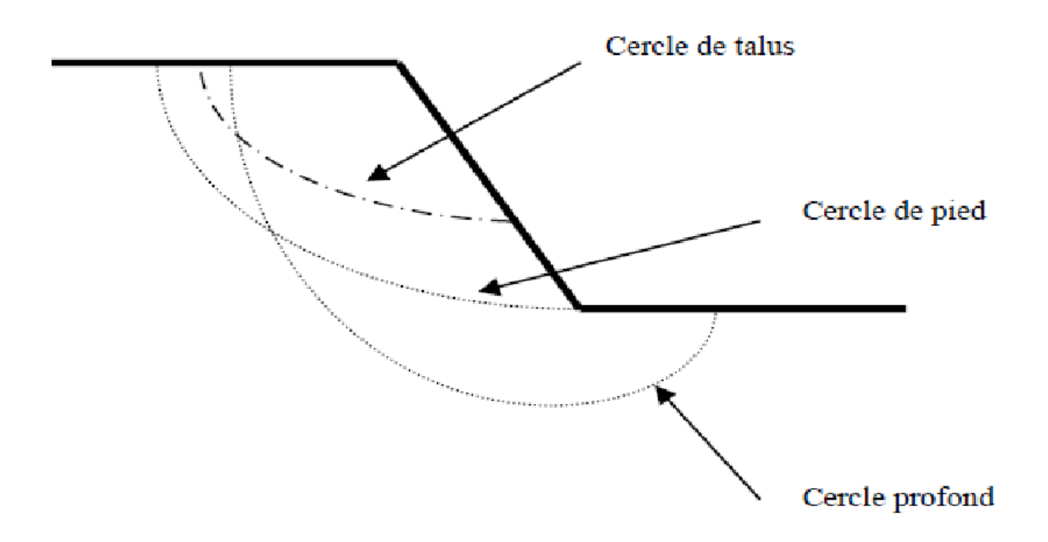
## 4) Les coulées boueuses

Les coulées boueuses sont dues à des infiltrations d'eau provoquant des mouvements de sols dans lesquels les matières glissées se comportent comme un liquide.

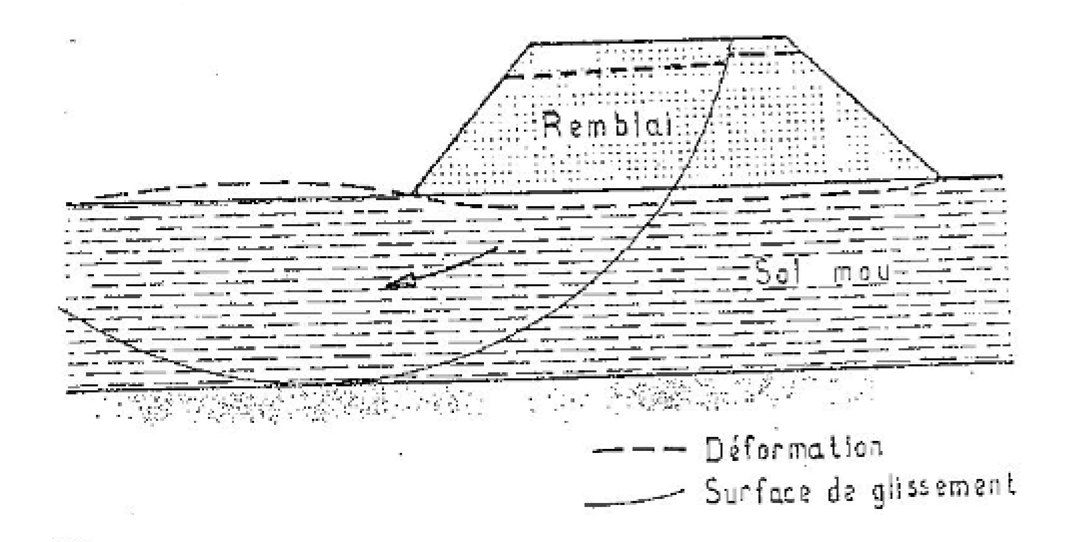




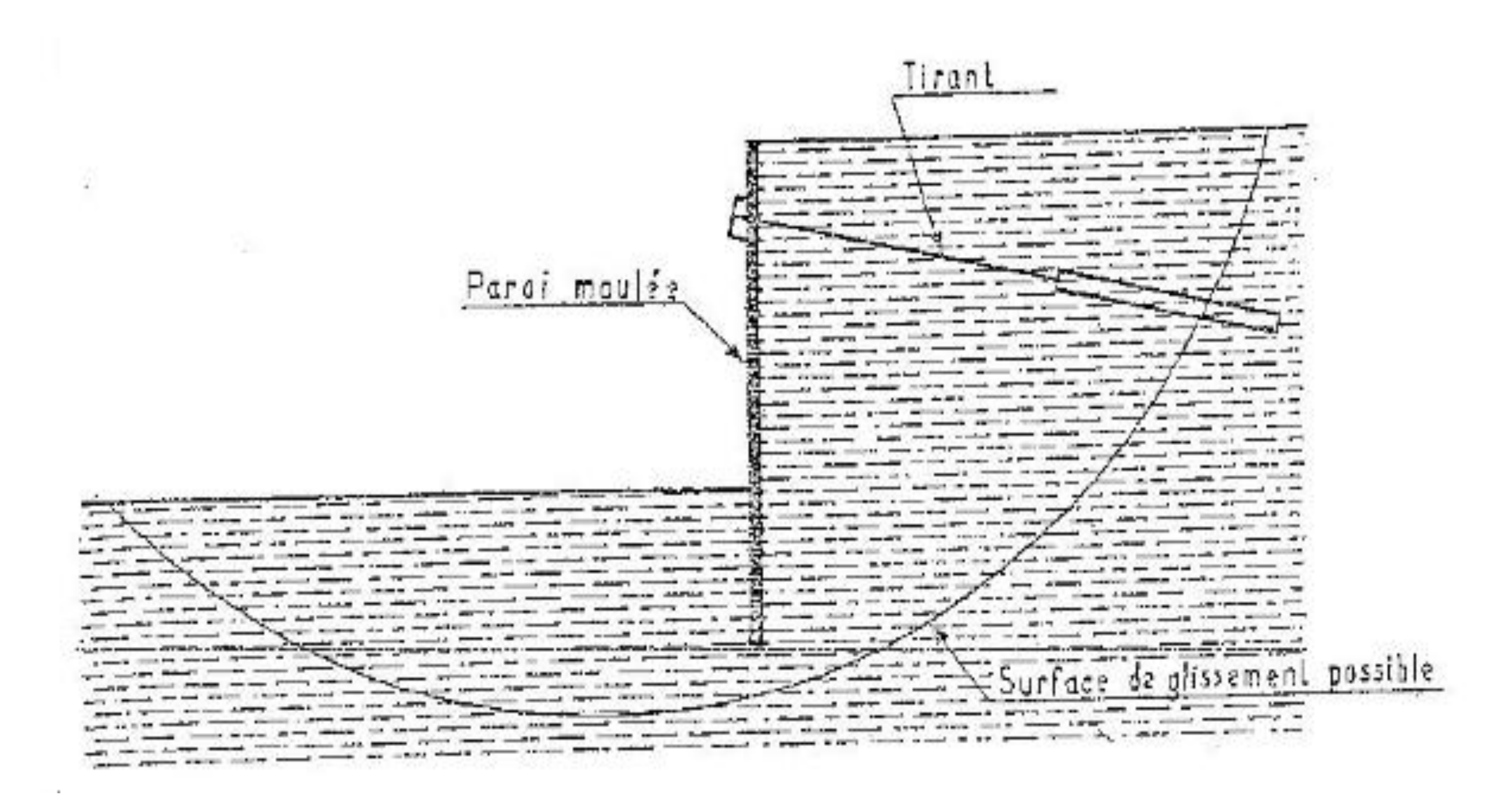
# 5) Talus en déblai et talus en remblai sur sols non compressible




# 6) Talus en remblai sur sols compressible



## 7) Les ouvrages de soutènement



## III. Stabilité des pentes en rupture plane

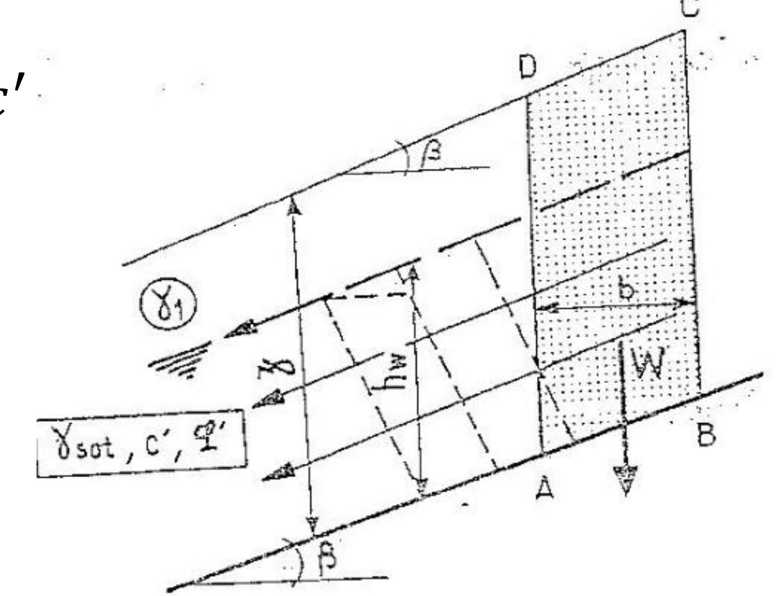
Dans le cas de certains versants naturels, une couche ou une interface peuvent guider le glissement ( par exemple formations meubles reposant sur un substratum) : la surface de rupture est alors à peu près plane.

### 1) Pente indéfinie, rupture selon un plan parallèle à la pente

#### a) Décomposition des forces :

Soit une pente indéfinie d'inclinaison β dans un sol de caractéristiques suivantes :

- ✓ Poids volumique : au dessus de la nappe : $\gamma_1$ ; au dessous de la nappe : $\gamma_{sat}$
- ✓ Cohésion le long du plan de glissement : $c'$
- ✓ Angle de frottement interne le long du plan de glissement $\varphi'$
- ✓ La nappe règne à une hauteur $h_w$ et s'écoule parallèlement à la pente

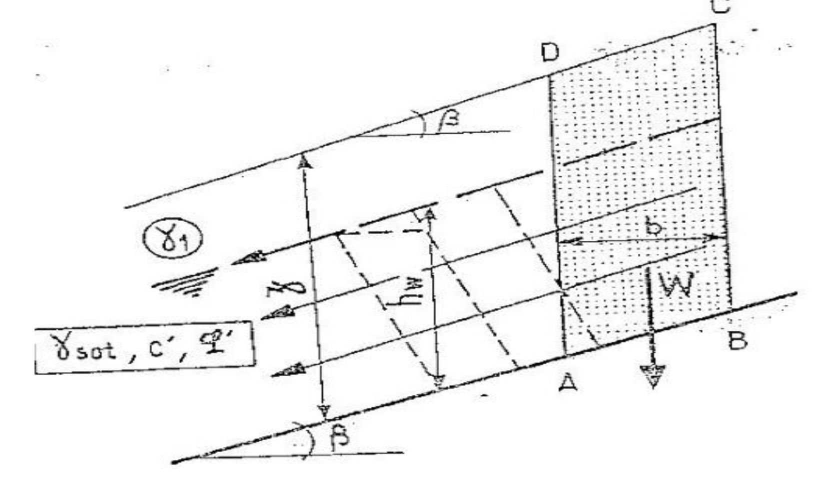


On considère le prisme ABCD , soit W son poids et b sa largeur

⇒ On a $W = [\gamma_1(z - h_w) + \gamma_{sat}.h_w]b = \mathrm{b}.\sum_0^z \gamma.h$

⇒ Par symétrie les réactions sur AD et BC sont égales et opposées

La décomposition de W en des composantes normale N et tangentielles T à la surface de glissement AB donne :




$N = b\cos\beta \sum_0^z \gamma.h$ et $\mathrm{T} = b\sin\beta \sum_0^z \gamma.h$

La pression interstitielle le long de AB est : $u = \gamma_w.h_w \cos^2\beta$

la résultante U des pressions interstitielles est normale à AB $U = u.AB$

$\mathrm{U} = \gamma_w.h_w.b\,cos\,\beta$

D'après l'équation de Coulomb, la résistance maximale mobilisable en cisaillement le long de AB est :

$$R = c'.AB + (N - U)\tan\varphi'$$

$$R = c'.\frac{b}{\cos\beta} + \left(\sum^{z}\gamma.h - \gamma_w.h_w\right)b.\cos\beta\,.\tan\varphi'$$

## b) Coefficient de sécurité global :

Le coefficient de sécurité global de la rupture le long du plan situé à la profondeur z est donnée par la formule suivante :

$$F_s = \frac{R}{T} = \frac{c' + \left(\sum_0^z \gamma . h \ - \gamma_w . h_w\right) \cos^2 \beta \, . \tan \varphi'}{\cos \beta \sin \beta \sum_0^z \gamma . h}$$

**Remarques :**

1) $F_s$ diminue lorsque $h_w$ augmente . Ceci explique que les glissements de terrain se produisent essentiellement en période pluvieuse.

2) S'il n y a pas de nappe et le sol et homogène :

$$F_s = \frac{c + \gamma . z \cos^2 \beta \, . \tan \varphi}{\gamma . z \cos \beta \sin \beta}$$

En milieu homogène cohérent $F_s$ diminue lorsque z augmente . La rupture plane correspond donc au glissement du manteau d'altération sur les couches profondes intactes.

3) En plus si le sol et non cohésif :

$$F_s = \frac{\tan \varphi}{\tan \beta}$$

## 2) Pente de hauteur finie :

Soit le talus suivant qui menace de glisser sur couche savon de pente β

Étudions l'équilibre du volume de sol compris entre le plan amont AD et le plan aval BC.

Les forces qui provoquent le mouvement sont :

- ✓ la composante $P'_a$ selon la direction AB
- ✓ La composante selon la direction AB du poids des terres W

$$T = W \sin\beta$$

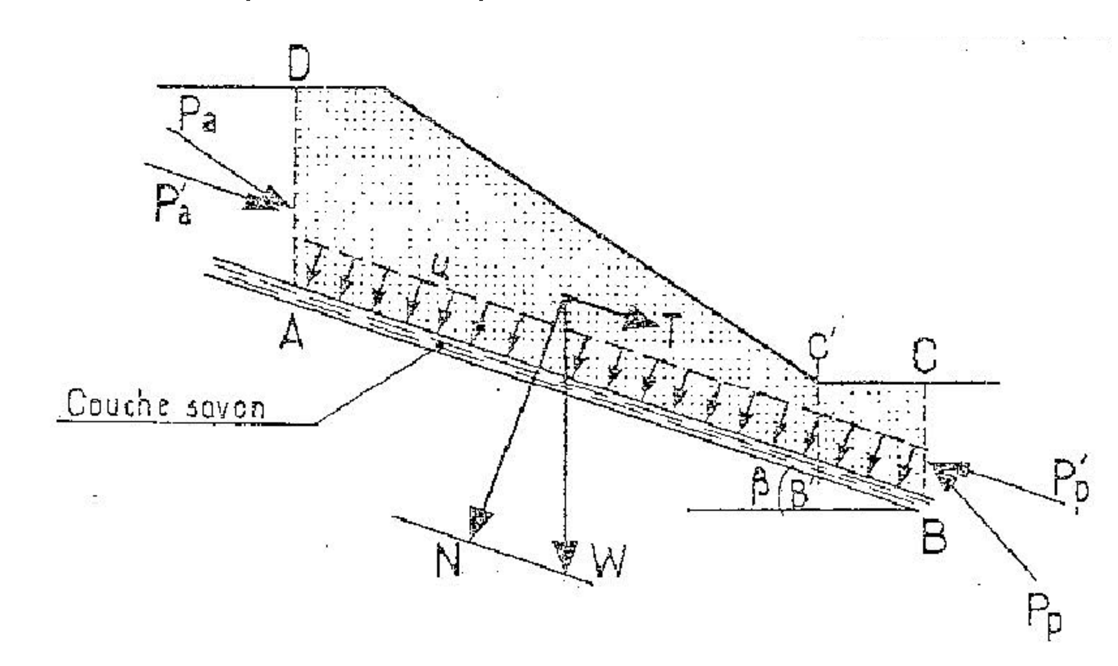
Les forces résistantes sont :

- ✓ la composante $P'_p$ selon la direction AB de la réaction du sol à l'aval ( butée)
- ✓ La résistance au cisaillement le long de AB qui est égale à :

$$R = c'.AB + (W\cos\beta - U)\tan\varphi'$$

Avec $U = \int_A^B u.dt$

$c'$ et $\varphi'$ les caractéristiques effectives de la couche savon



Le coefficient de sécurité global est donc :

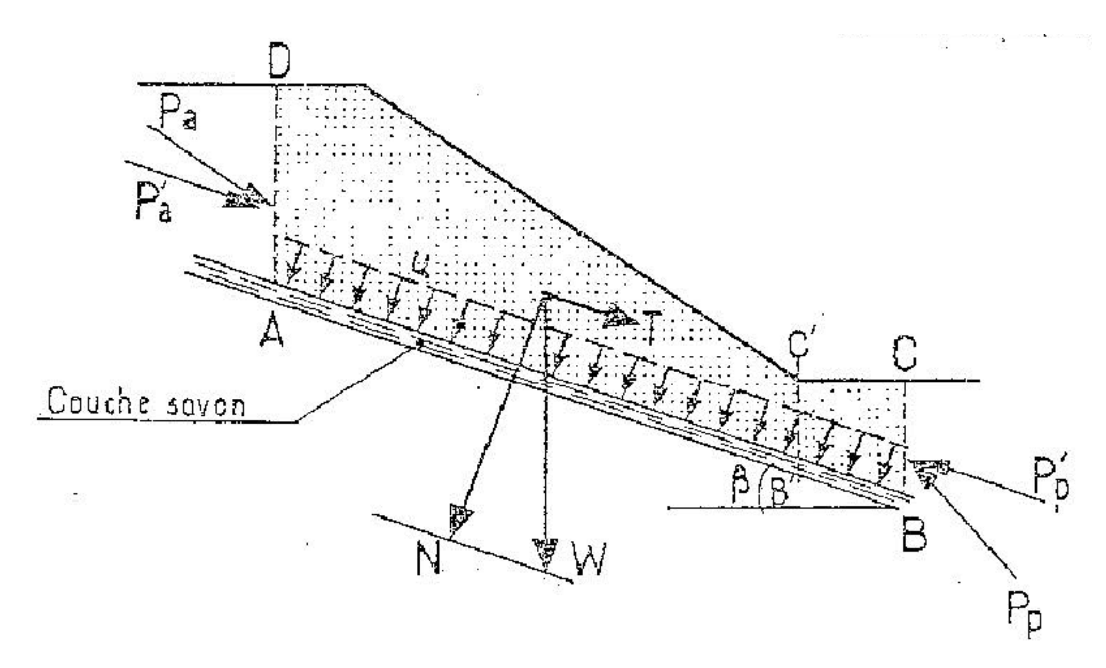
$$F_s = \frac{R + P'_p}{p'_a + T}$$

**Remarque :**

La position des plans AD et BC est choisie de manière à donner la valeur minimale de $F_s$ .

La position la plus défavorable pour BC est généralement le pieds du talus.

La détermination de $P_a$ et $P_p$ se fera dans le chapitre « action des terres sur les soutènement »

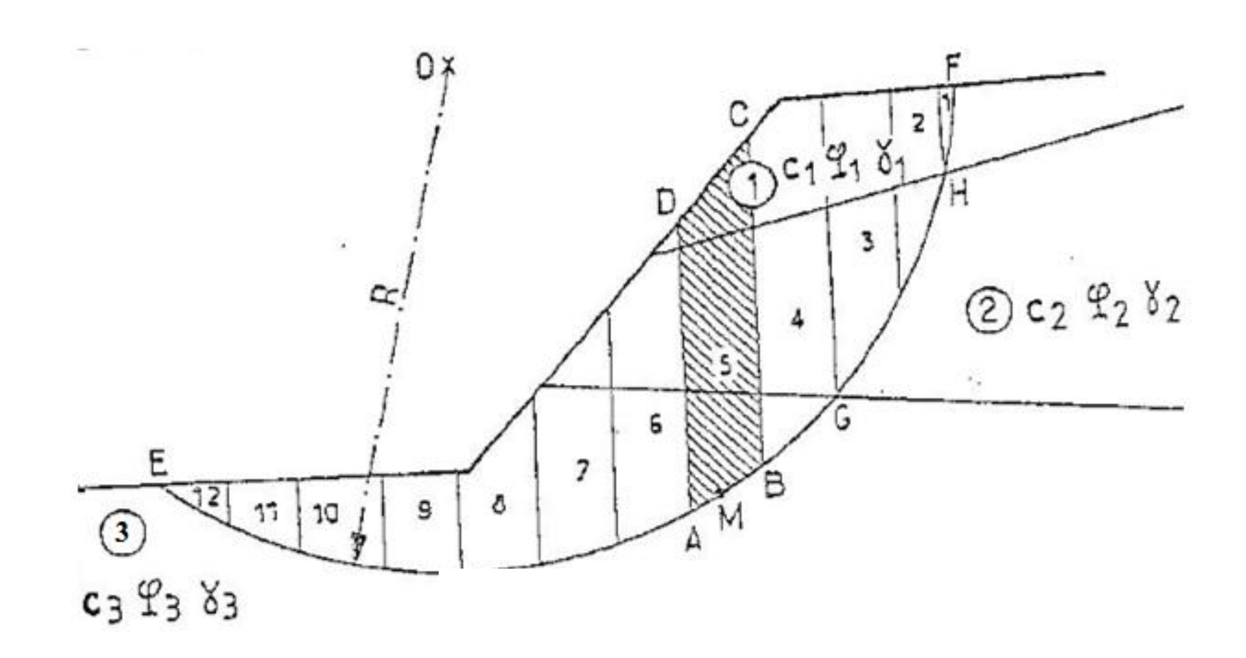


# III. Stabilité en rupture circulaire avec coefficient de sécurité global

## 1) Méthode des tranches de FELLENIUS

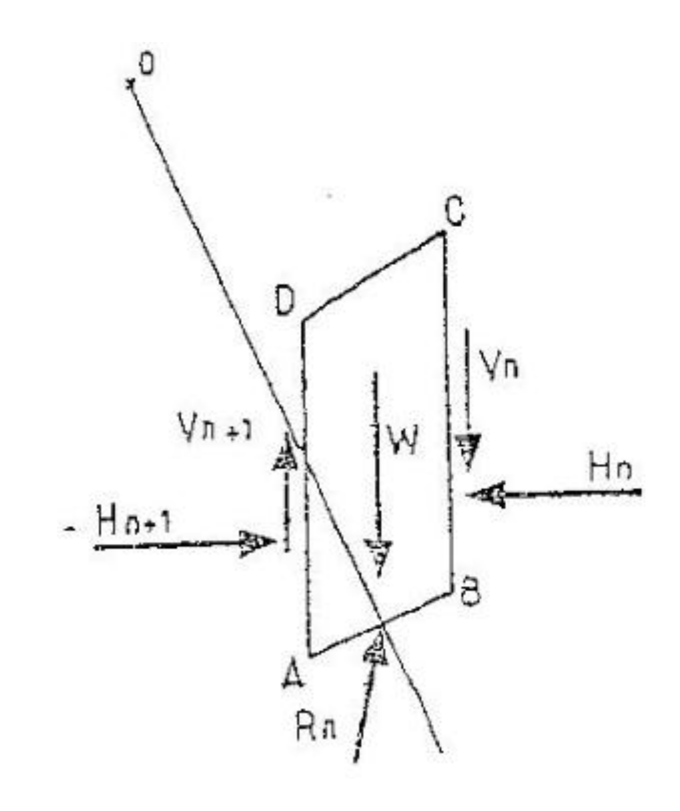
Soit un cercle quelconque de centre O et de rayon R pour lequel on désire vérifier la stabilité vis-à-vis le glissement. La méthode consiste à découper le volume compris dans l’arc EMF en un certain nombre de tranches limitées par des plans verticaux.

Il convient de réaliser le découpage de telle façon que l’intersection du cercle et d’une limite de couche ( point G et H) corresponde à une limite de couche .



Étudions l'équilibre de la tranche ABCD . Les forces agissant sur cette tranche :

- Le poids $W_n$
- La réaction $R_n$ du milieu sous-jacent sur l'arc AB
- Les réactions sur les faces verticales BC et AD .




Le coefficient global de sécurité global $F_s$ est défini par le quotient :

$$F_s = \frac{\sum_{EF} des\ moments\ résistants\ maximaux}{\sum_{EF} des\ moments\ moteurs}$$

- **Hypothèse spécifique** *:* Les efforts inter-tranches sont ignorés

Donc $W = -R$

Largeur de tranche pas trop grande => l'arc AB peut être confondu avec la corde

D'après la loi de Coulomb : $R_t = c_i . AB + W_n . \cos \alpha_n . \tan \varphi_i$

La somme des moments pour toutes les tranches est :

$$\sum_{n=1}^{n=m} R \times (c_i . l_n + W_n . \cos \alpha_n . \tan \varphi_i)$$

m: nombre total des tranches

$c_i$ et $\varphi_i$ caractéristiques mécaniques de la couche dans laquelle est située AB.

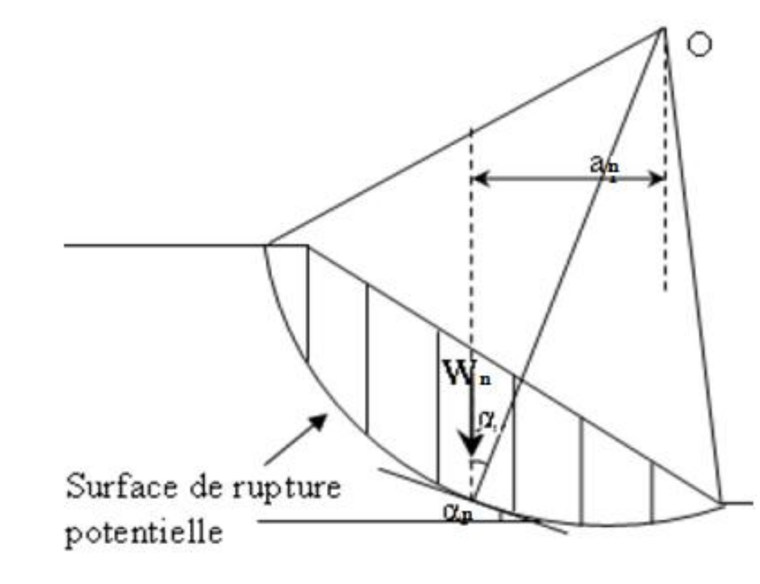
Le moment moteur est dû au poids et égale à : $W_n a_n$

$a_n$ : bras de levier , $a_n = R \times \sin \alpha_n$

$\alpha_n$: l'angle que fait le rayon du cercle passant par le milieu de la base de la tranche avec la verticale

$l_n$ : longueur de la base de la tranche

D'où



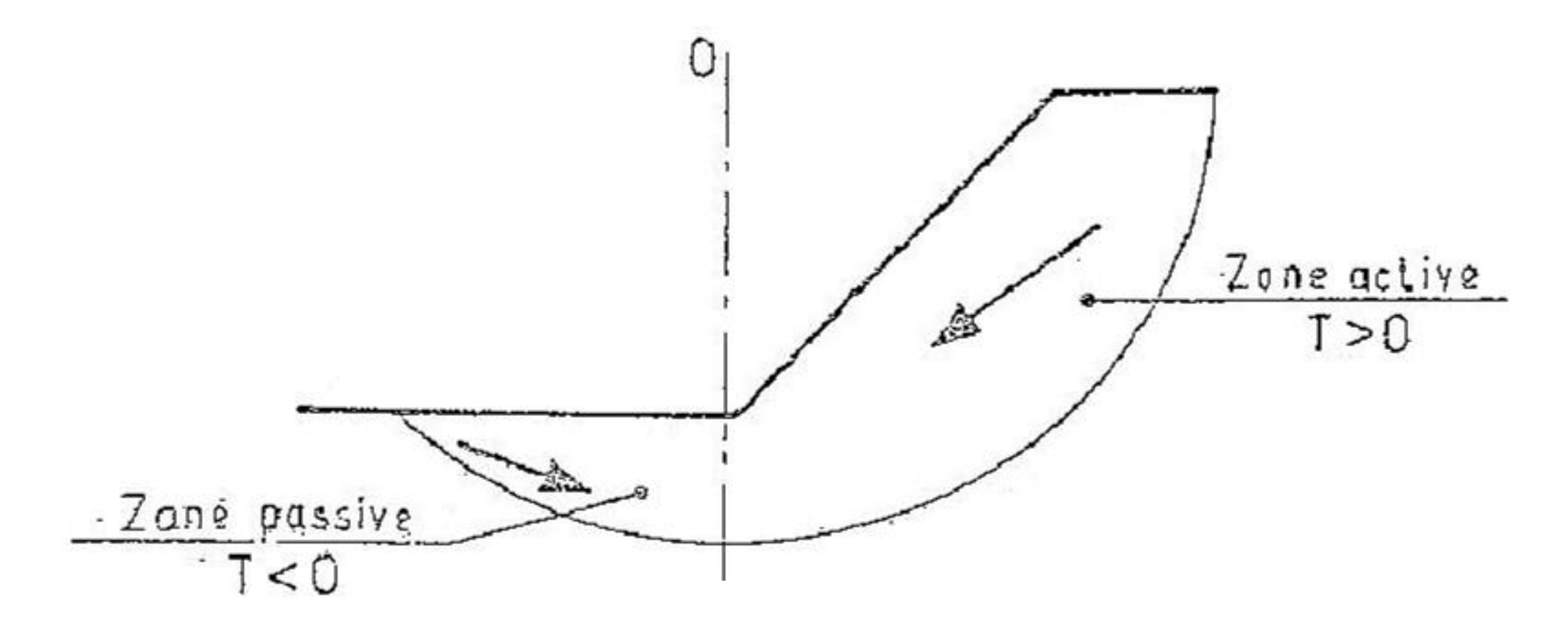

$$F_s = \frac{\sum_{n=1}^{n=m} (c_i . l_n + W_n . \cos \alpha_n . \tan \varphi_i)}{\sum_{n=1}^{n=m} W_n \sin \alpha_n}$$

## Remarque :

1) Si le sol est homogène , $c = cte\ et\ \varphi = cte$ et L est la longueur développée de la surface de rupture $F_s$ devient :

$$F_s = \frac{c.L + tan\varphi \sum W_n cos\alpha_n}{\sum W_n \sin \alpha_n}$$

2) Lorsque les cercles sont profonds, c.à.d. Lorsque la ligne de rupture dépasse l'aplomb du centre du cercle vers le coté aval. La massif du sol situé côté aval a un effet stabilisateur .

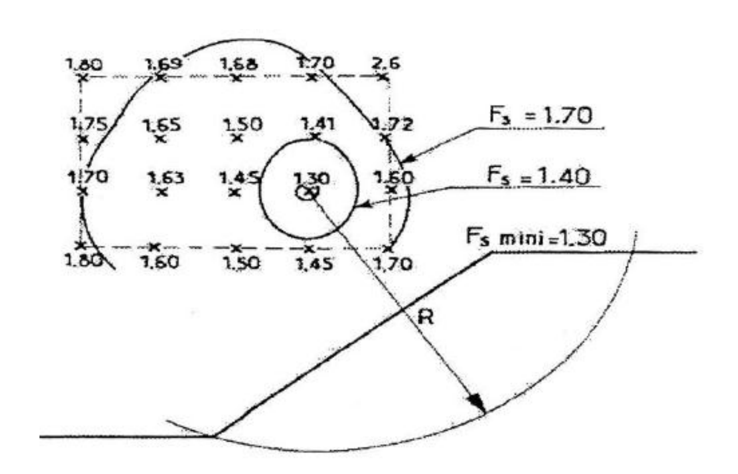


3) Le facteur de sécurité peut être affecté aux caractéristiques mécaniques $c$ et $\varphi$

$${c_i}^* = \frac{c_i}{F_s} \quad \text{et} \quad {\varphi_i}^* = \frac{\varphi_i}{F_s}$$

4) Pour déterminer le coefficient de sécurité réel d'un talus il faut chercher le cercle donnant la valeur minimale de $F_s$. Dans le cas général il y a une triple infinité de possibilité :

- ✓ pour un centre donnée, il est possible de faire varier le rayon du cercle.
- ✓ La position du centre peut varier dans le sens horizontal
- ✓ La position du centre peut varier dans le sens vertical




5) Prise en compte des nappes

La méthode des tranches est appliquée en utilisant l'équation de Coulomb :

$$\tau = c' + (\sigma - u)tan\varphi'$$

## 2) Méthode des tranches de BISHOP

### 1) Méthode détaillée :

Les composante $V_n$ , $V_{n+1}$, $H_n$, $H_{n+1}$ des réactions sur les tranches verticales interviennent dans les efforts appliqués sur AB.

Le coefficient de sécurité est donné par la formule générale suivante :

$$F_s = \frac{1}{\sum_{n=1}^{n=m} W_n \sin \alpha_n} . \sum_{n=1}^{n=m} \frac{(W_n + (V_n - V_{n+1}) - u_n . l_n) \tan \varphi'_n + c'_n . l_n}{\cos \alpha_n + \sin \alpha_n . \frac{\tan \varphi'_n}{F_s}}$$

Pour déterminer $F_s$ , il faut :

- ✓ Procéder par itérations successives, puisque $F_s$ figure aux deux membres de l'équation.
- ✓ Définir $V_n - V_{n+1}$ , pour cela une hypothèse supplémentaire est nécessaire.

## 2) Méthode de BISHOP simplifiée :

L'hypothèse supplémentaires est que $V_n - V_{n+1} = 0$ , quelle que soit la tranche considérée $F_s$ devient :

$$F_s = \frac{1}{\sum_{i=1}^{i=m} W_i \sin \alpha_i} \cdot \sum_{i=1}^{i=m} \frac{(W_i - u_i . l_i) \tan {\varphi'}_i + {c'}_i . l_i}{\cos \alpha_i + \sin \alpha_i . \frac{\tan {\varphi'}_i}{F_s}}$$

Tous les termes sont connus et $F_s$ est calculé par itérations successives. La première itération est faite en adoptant comme valeur $F_{s0}$ le coefficient de sécurité  obtenu par la méthode de FELLENIUS.

## 3) Choix de la méthode et du coefficient de sécurité :

- ✓ La méthode de Fellenius donne généralement des coefficient de sécurité plus faibles que la méthode de Bishop .
- ✓ La méthode de Bishop simplifiée est couramment utilisée , et celle détaillée ne présente que peu d'intérêt devant les incertitudes liées aux autres paramètres
- ✓ l'expérience a montré , que sauf erreur grossière sur les hypothèses de calcul :

$\Rightarrow$ Les talus restent toujours stables si $F_S > 1{,}5$

$\Rightarrow$ Le glissement est pratiquement inévitable si $F_S < 1$

## IV. Abaques et formules:

Ils existent plusieurs abaques et formules concernant les pentes et talus présentant selon les simplifications que peut présenté le cas étudié ( géométrie simple, homogénéité , nombre de couche réduit )

### 1) Talus dans un sol pulvérulent:

#### a) sans écoulement :

Dans un sol pulvérulent d'angle de frottement φ . La pente maximale d'un talus est : $\beta = \varphi$ (∀ la hauteur du talus )

L'angle de talus naturel : l'angle que prend le talus lorsque le sol pulvérulent est déversé en tas.

## Remarque:

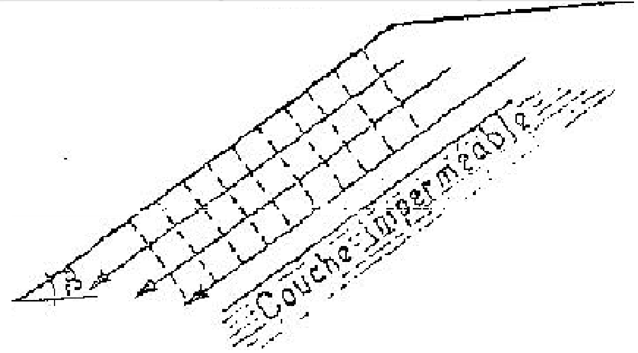
Dans les sables humides il y a toujours une certaine cohésion capillaire permettant au talus de tenir à des pentes très raides voire verticales. Cependant le coefficient de sécurité est très faible et une faible perturbation peut causer la rupture.

## b) avec écoulement :

On rencontre souvent des réseaux d’écoulement qui peuvent être ramené à des cas simple :

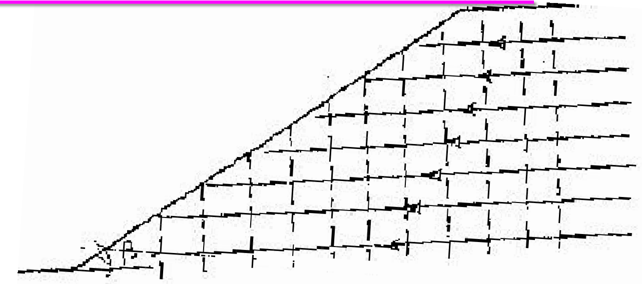
Soit $\beta_{lim}$ l’angle d’équilibre limite ( qui correspond à $F_s = 1$ )

### Cas 1 : écoulement parallèle à la pente :



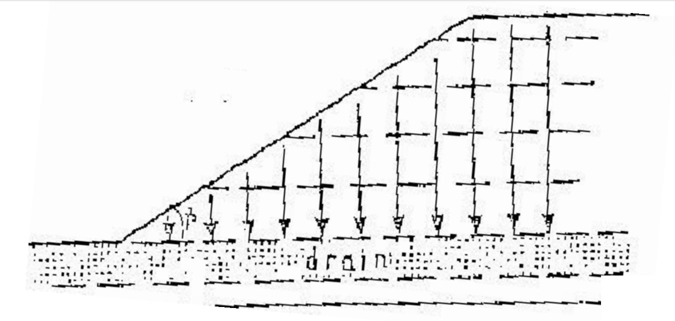

$$\tan \beta_{lim} = \frac{1}{2} \tan \varphi'$$

### Cas 1 : écoulement horizontal :




$$\beta_{lim} = \frac{1}{2} \varphi'$$

### Cas 1 : écoulement vertical descendant :




$$\beta_{lim} = \varphi'$$

## 2) Talus dans un sol homogène cohérent :

### a) Méthode de Taylor : Sols purement cohérent

- *Hypothèses :*

✓ Talus de hauteur H et de largeur B $\tan\beta = \frac{H}{B}$

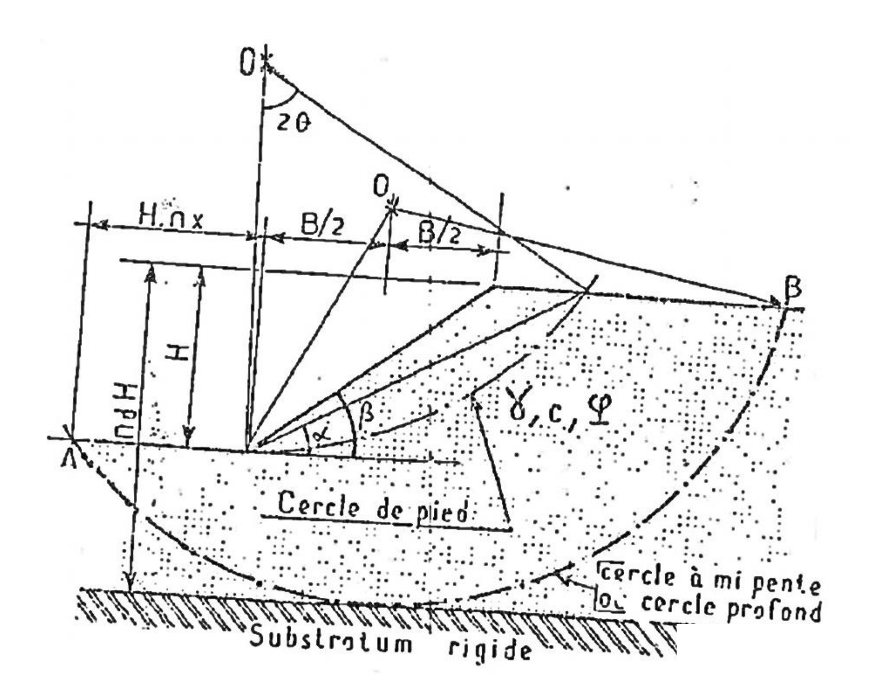
✓ Surface libre horizontale,

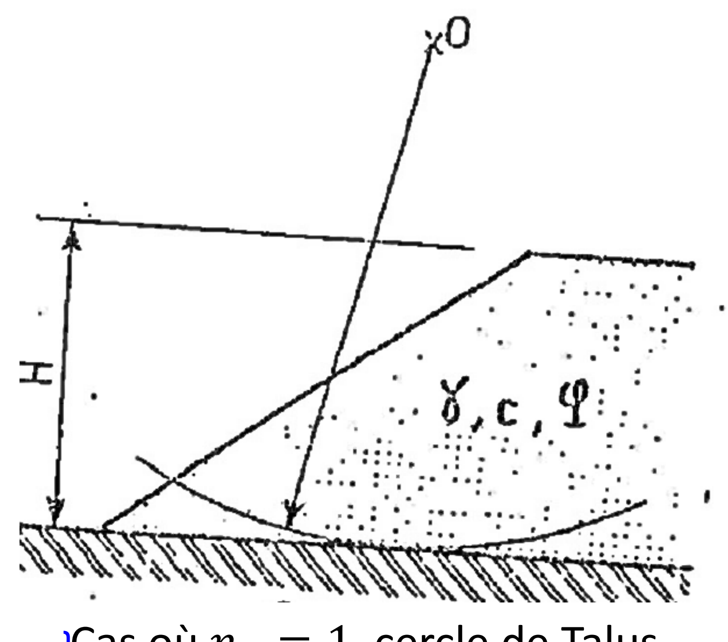
✓ Sol homogène : poids spécifique γ ,

✓ cohésion $c \neq 0$ ,

✓ Angle de frottement interne φ = 0 ,

✓ Présence d'un substratum résistant à la profondeur $n_d H$




Cas où $n_d = 1$ cercle de Talus

Le coefficient de sécurité est alors donné par la relation :

$F_s = \frac{c.L}{\sum T}$ avec L: longueur totale de l'arc AB

Or *L* est proportionnel à *H*

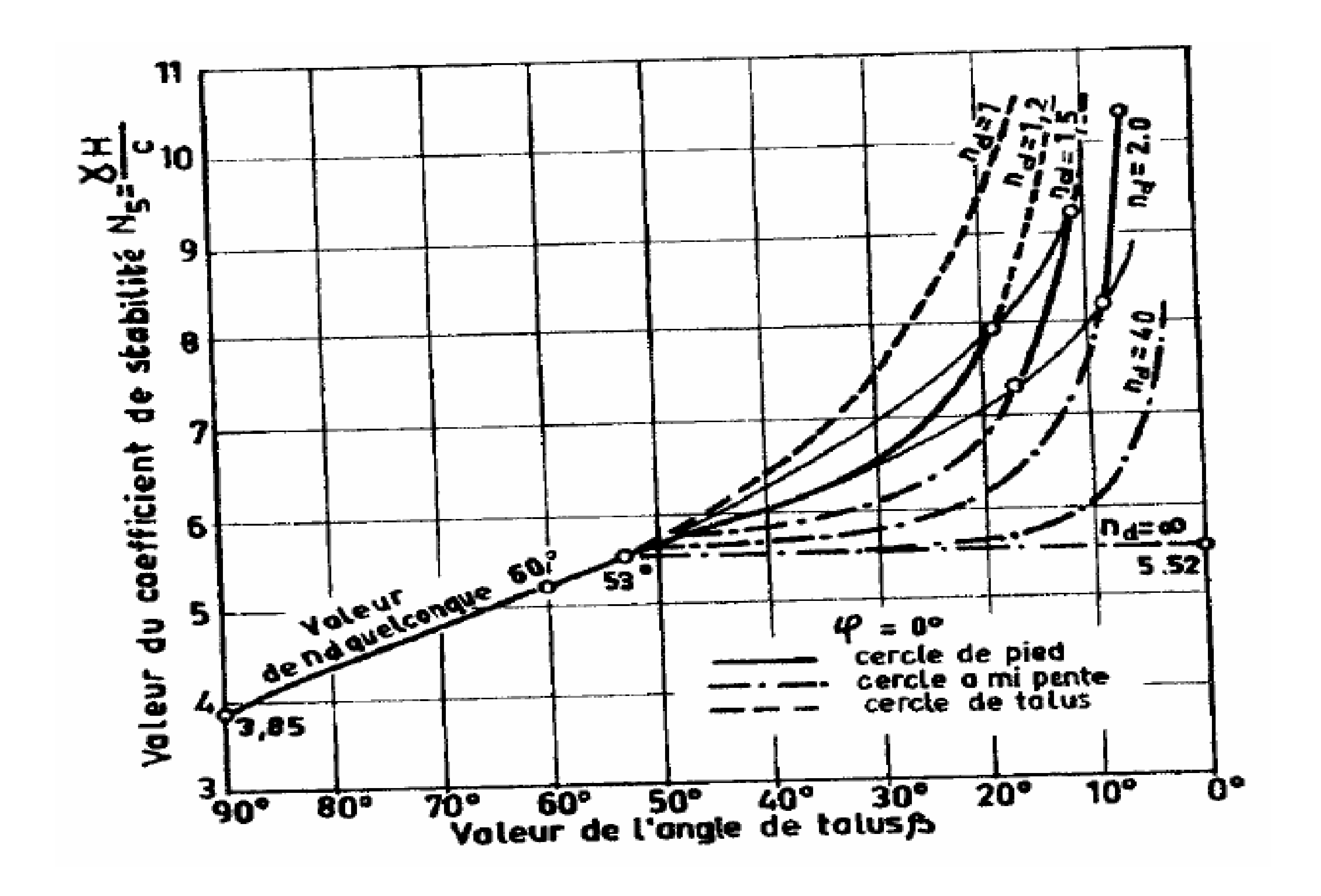
*T* est proportionnel à *W* donc à γ et à H² ( H et B ) . Donc :

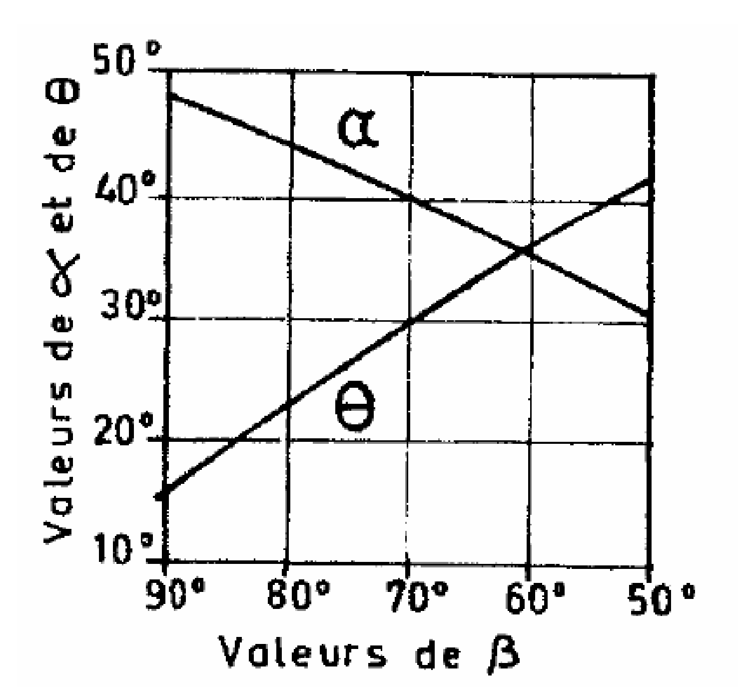
$$F_s = f(\frac{\gamma H}{c})$$

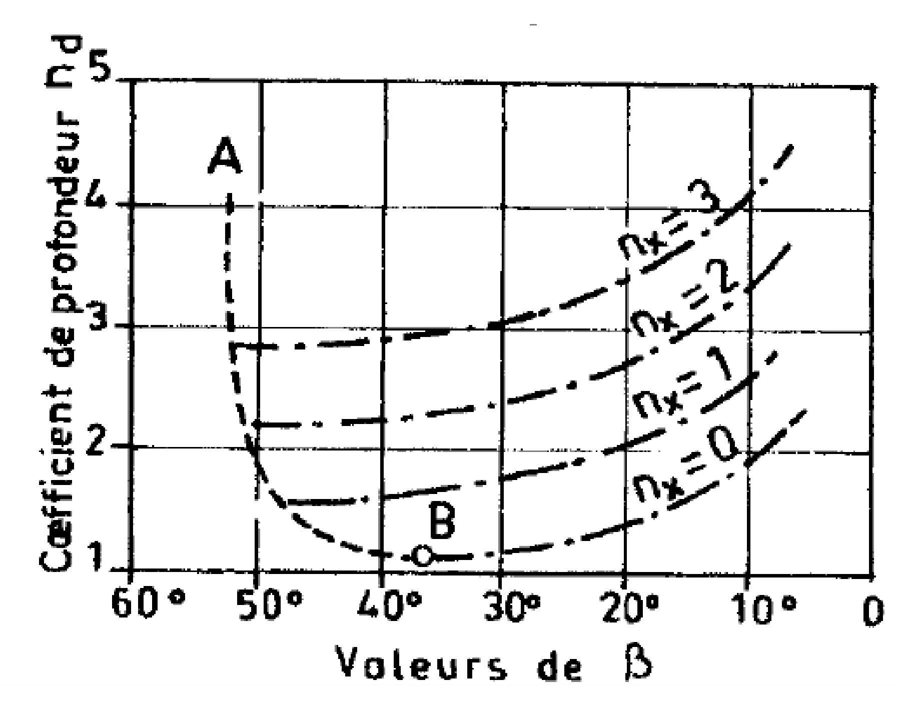
On note $N_s = \frac{\gamma H}{c}$ coefficient de stabilité

L'abaque suivant permet de déterminer la valeur de $N_s$ correspondant à $F_s = 1$ , connaissant $n_d$ et β.

- L'abaque permet de préciser le type de glissement susceptible de se produire, selon les valeurs de $n_d$ et β
- Si le cercle critique est un cercle de pied , son centre peut être localisé à l'aide de α et θ en fonction de β
- Si le cercle critique est un cercle profond , son centre est situé à mi-hauteur du talus. Le cercle est déterminer à l'aide de $n_x$ qui est donné en fonction de $n_d$ et β.


Valeur du coefficient de stabilité $N_S = \frac{\gamma H}{c}$
Valeur de l'angle de talus β
Valeur de nd quelconque
60°
53°
3,85
5.52
$n_d = 1$
$n_d = 1,2$
$n_d = 1,5$
$n_d = 2,0$
$n_d = 4,0$
$n_d = \infty$
φ = 0°
cercle de pied
cercle a mi pente
cercle de talus
90° 80° 70° 60° 50° 40° 30° 20° 10° 0°
3 4 5 6 7 8 9 10 11






Ces abaques permettent de déterminer :

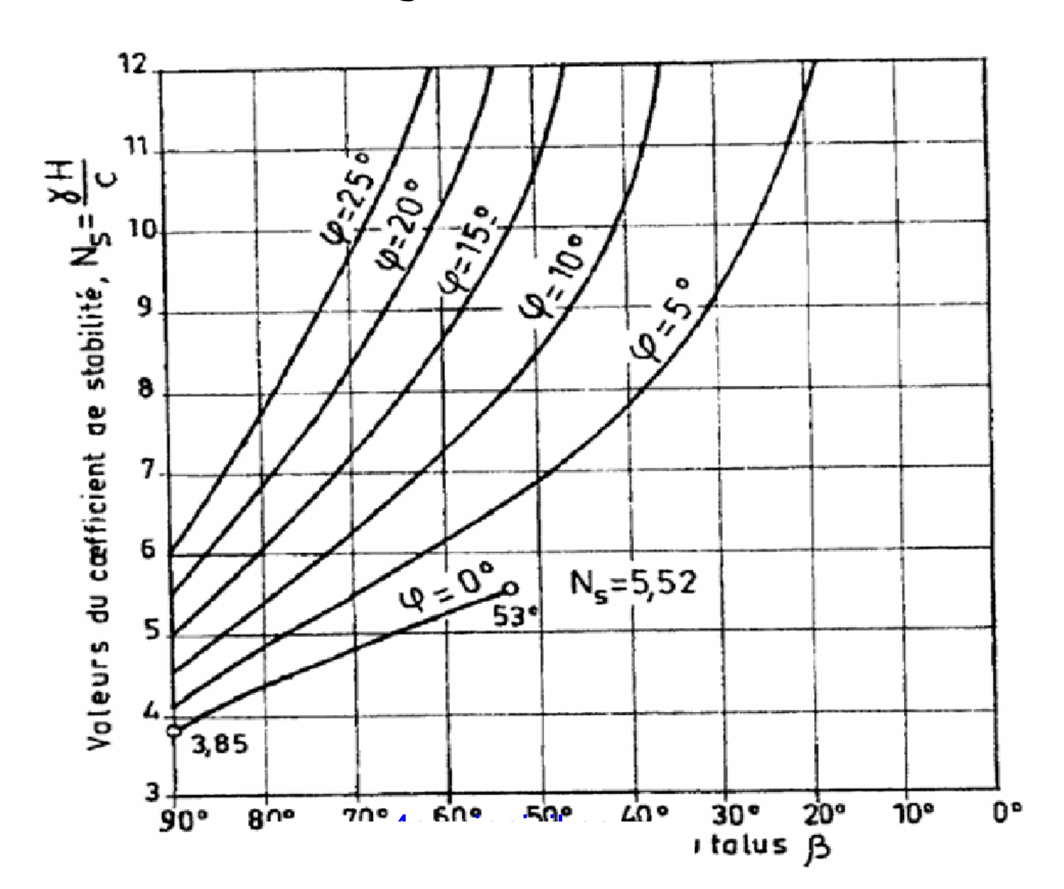
- ✓ Soit la hauteur critique $H_c$ correspondant à $F_s = 1$ et pour la cohésion réelle du sol.
- ✓ Soit de calculer la cohésion minimale $c_{min}$ nécessaire pour que le talus de hauteur H soit stable toujours avec $F_s = 1$

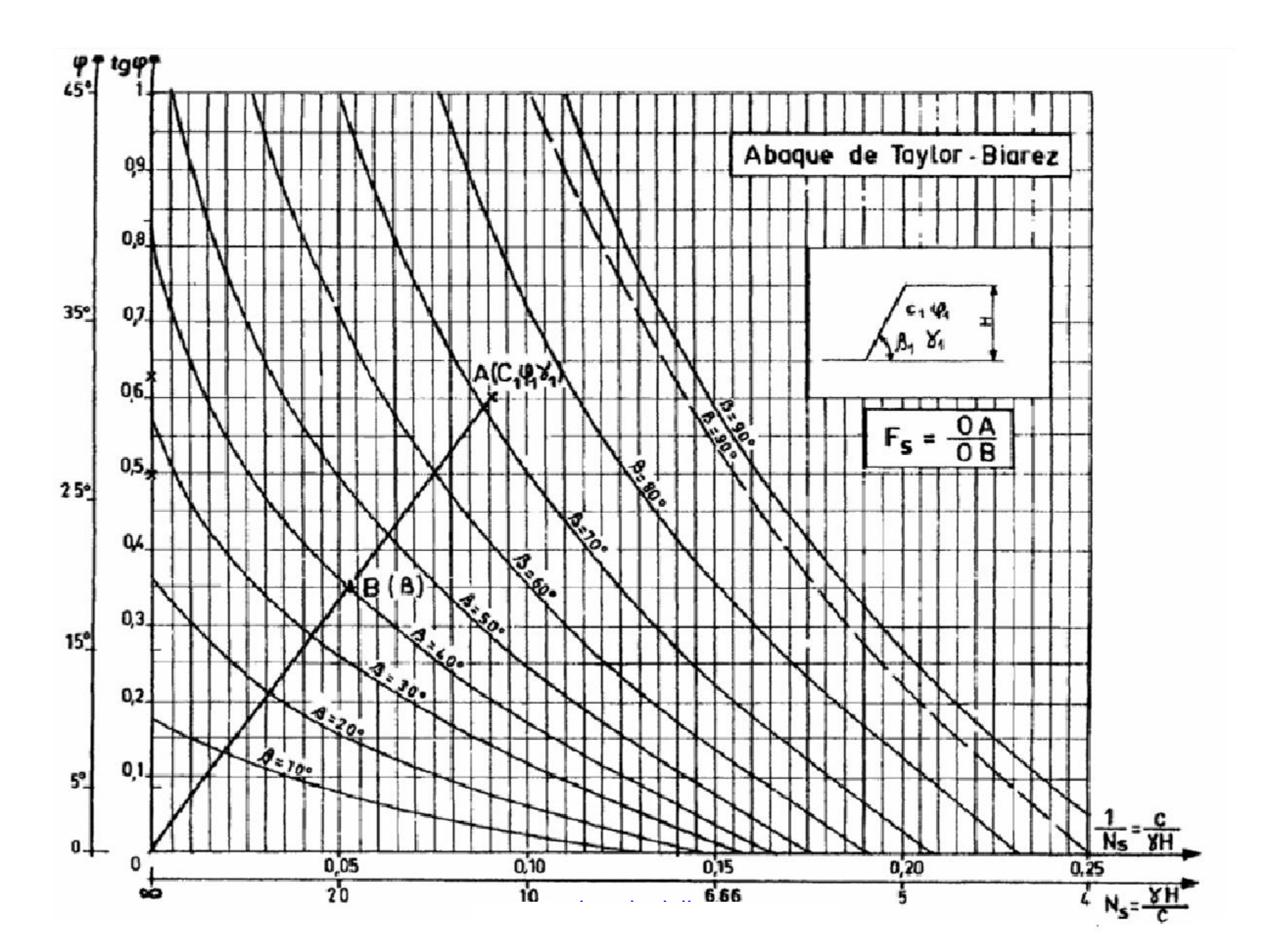
Le coefficient de sécurité globale est déterminé par l'une des deux formules :

$$F_s = \frac{H_c}{H} \qquad\qquad F_s = \frac{c}{c_{min}}$$

## b) Sols cohérents à frottement interne

Si φ > 3° , on démontre que le cercle critique est dans ce cas toujours un cercle de pied . Le coefficient de sécurité *F* dépend toujours du nombre de stabilité de TAYLOR, de β , mais également de φ . L'abaque suivant donne la valeur de $N_s$ en fonction de β , et de φ pour $F_s = 1$ .





Abaque de Taylor - Biarez
$F_s = \frac{OA}{OB}$
A($C_1 \varphi_1 \gamma_1$)
B (β)
β=10°
β=20°
β=30°
β=40°
β=50°
β=60°
β=70°
β=80°
β=90°
β=90°
$c_1 \varphi_1$
$\beta_1$ $\gamma_1$
H
φ
tgφ
45°
35°
25°
15°
5°
1
0,9
0,8
0,7
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0
0
0,05
0,10
0,15
0,20
0,25
$\frac{1}{N_s} = \frac{c}{\gamma H}$
∞
20
10
6.66
5
4
$N_s = \frac{\gamma H}{c}$